

III NITRIDE SEMICONDUCTOR AND METHOD OF MANUFACTURING THE SAME, AND SEMICONDUCTOR DEVICE AND METHOD OF MANUFACTURING THE SAME

Publication number: JP2002324913

Publication date: 2002-11-08

Inventor: IWATA HIROKAZU; SARAYAMA SHOJI; MIKI TAKESHI

Applicant: RICOH KK

Classification:

- **International:** H01L33/00; H01L21/205; H01S5/323; H01S5/343;
H01L33/00; H01L21/02; H01S5/00; (IPC1-7):
H01L33/00; H01L21/205; H01S5/323

- **European:**

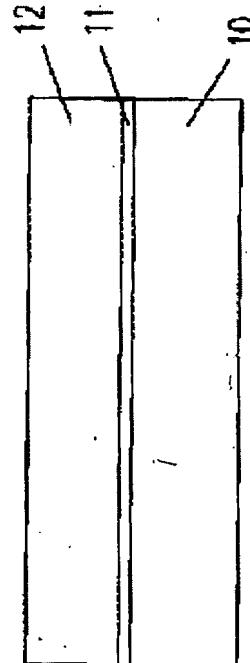
Application number: JP20010127209 20010425

Priority number(s): JP20010127209 20010425

[Report a data error here](#)

Abstract of JP2002324913

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a III nitride semiconductor which has higher carrier concentration and higher quality than the conventional one. **SOLUTION:** On a sapphire substrate 10, a low-temperature GaN buffer layer 11 and a p-type Al_x Ga(1-x) N ($0 \leq x \leq 1$) layer 12 as the III nitride semiconductor are stacked in this order. The p-type Al_x Ga(1-x) N ($0 \leq x \leq 1$) layer 12 is, for example, a p-type Al_{0.08} Ga_{0.92} N layer where $x=0.08$. The p-type Al_{0.08} Ga_{0.92} N layer 12 includes Mg (magnesium) which is a p-type impurity and B (boron), each in a quantity of about 8×10^{19} cm⁻³.



Data supplied from the [esp@cenet](#) database - Worldwide

(19)日本特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-324913

(P2002-324913A)

(43)公開日 平成14年11月8日 (2002.11.8)

(51)Int.Cl.⁷
H 01 L 33/00
21/205
H 01 S 5/323

識別記号
6 1 0

F I
H 01 L 33/00
21/205
H 01 S 5/323

テマコト^{*}(参考)
C 5 F 0 4 1
5 F 0 4 5
6 1 0 5 F 0 7 3

審査請求 未請求 請求項の数13 O.L (全 25 頁)

(21)出願番号 特願2001-127209(P2001-127209)

(22)出願日 平成13年4月25日 (2001.4.25)

(71)出願人 000006747

株式会社リコー

東京都大田区中馬込1丁目3番6号

(72)発明者 岩田 浩和

東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
会社リコー内

(72)発明者 皿山 正二

東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
会社リコー内

(74)代理人 100090240

弁理士 植本 雅治

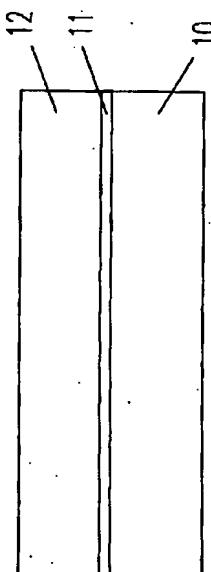
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 III族窒化物半導体およびその作製方法および半導体装置およびその作製方法

(57)【要約】

【課題】 従来よりもキャリア濃度が高くかつ高品質の
III族窒化物半導体を提供する。

【解決手段】 サファイア基板10上には、低温GaN
バッファー層11、III族窒化物半導体としてのp型A
 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$) 層12が順次に積層され
ている。ここで、p型A $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)
層12は、例えばx=0.08のp型A $A_{1-0.08}Ga_{0.92}N$ 層12に
N層である。そして、p型A $A_{1-0.08}Ga_{0.92}N$ 層12に
は、p型不純物のMg (マグネシウム) と同時にB (ボ
ロン) が含まれている。ここで、MgとBは、ともに $8 \times 10^{19} c m^{-3}$ 程度含まれている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 Mgが添加されたp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)において、前記p型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)には、Mgと同時にBが添加されていることを特徴とするIII族窒化物半導体。

【請求項2】 請求項1記載のIII族窒化物半導体を含む半導体積層構造を有していることを特徴とする半導体装置。

【請求項3】 請求項2記載の半導体装置において、p側オーム接続電極を形成するコンタクト層に請求項1記載のIII族窒化物半導体を用いることを特徴とする半導体装置。

【請求項4】 請求項2または請求項3記載の半導体装置において、該半導体装置は半導体発光素子であることを特徴とする半導体装置。

【請求項5】 請求項4記載の半導体装置において、前記半導体発光素子は半導体レーザー素子であることを特徴とする半導体装置。

【請求項6】 請求項4または請求項5記載の半導体装置において、前記半導体発光素子は、発光波長が400 nm以下であることを特徴とする半導体装置。

【請求項7】 請求項5記載の半導体装置において、半導体装置としての半導体レーザー素子は、請求項1記載のIII族窒化物半導体をクラッド層に用いた少なくとも1つのp-n接合を有していることを特徴とする半導体装置。

【請求項8】 Mgと同時にBが添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む冷却雰囲気で行なうことを特徴とするIII族窒化物半導体の作製方法。

【請求項9】 請求項8記載のIII族窒化物半導体の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料は NH_3 であることを特徴とするIII族窒化物半導体の作製方法。

【請求項10】 Mgと同時にBが添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、 NH_3 の冷却雰囲気で行なうことを特徴とするIII族窒化物半導体の作製方法。

【請求項11】 Mgと同時にBが添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む雰囲気で行なうことを特徴とする半導体装置の作製方法。

【請求項12】 請求項11記載の半導体装置の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料は NH_3 であることを特徴とする半導体装置の作製方法。

【請求項13】 Mgと同時にBが添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体積層構造

を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、 NH_3 の冷却雰囲気で行なうことを特徴とする半導体装置の作製方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、DVDやCD等の光ピックアップ用光源、電子写真用の書き込み光源、光通信用光源、紫外線センサー、高温動作トランジスター等に利用されるIII族窒化物半導体およびその作製方法および半導体装置およびその作製方法に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、青色のLEDは赤色や緑色のLEDに比べて輝度が小さく実用化に難点があったが、近年、一般式 $InAlGaN$ で表されるIII族窒化物半導体において、低温 AlN バッファー層あるいは低温 GaN バッファー層を用いた結晶成長技術の向上と、水素パシベーションによって高抵抗化したp型層を熱処理によって低抵抗化する技術が見出され、高輝度の青色LEDが実用化された。

【0003】その後、更なる結晶性の向上と、p型 GaN の低抵抗化の研究が進み、種々の提案がなされ、低出力(数mW)ではあるが、室温近傍で連続発振する紫色半導体レーザーが実用化された。

【0004】以上のように、III族窒化物半導体装置の開発を行う上で、p型III族窒化物の作製技術は重要な基本技術となっている。

【0005】p型III族窒化物は、p型不純物と水素が結合し、p型不純物を不活性化してしまうため、水素を含む雰囲気での結晶成長や、水素ガス中や水素を生成するガス中で熱処理を行った場合には高抵抗化する。従って、水素をキャリアガスとして使用するMOCVD等の方法では、p型III族窒化物をas-grown(熱処理等の特別な後処理を行わない結晶成長したままの状態)で作製することは困難であった。

【0006】p型III族窒化物を作製するための方法としては、高抵抗化したIII族窒化物に特別な処理を行なってp型化する第1の作製方法と、結晶成長の工程を工夫することによってp型III族窒化物を作製する第2の作製方法とに大別される。

【0007】上記第1の作製方法において、p型化のための特別な処理に関しては、特開平5-183189号(以下、従来技術1という)には、水素や水素を生成する水素化物のガス(NH_3 等)を含まない雰囲気ガス中で、熱処理を行い、結晶中に含まれる水素の一部を結晶外へ拡散出し、低抵抗のp型にする方法が提案されている。

【0008】あるいは、特開平3-218625号(以下、従来技術2という)には、低エネルギーの電子線を照射し、結晶中に含まれる水素とp型不純物の結合を切って低抵抗のp型にする方法が提案されている。

【0009】また、上記第2の作製方法において、結晶成長の工程を工夫する仕方として、特開平8-12522号（以下、従来技術3という）には、結晶成長終了後の冷却過程を、窒素や不活性ガス等の水素を含まないガス雰囲気中で行うことで、低抵抗のp型にする方法が開示されている。

【0010】また、結晶成長を水素ガスを含まない系で行う方法も採られている。これは窒素をキャリアガスに使用したMOCVD法や、水素を含まない原料を使用するMBE法である。これらの方法では、as-grown（結晶成長したのみで、p型化の特別な処理をしていない状態）でp型GaNが得られることが知られている。

【0011】また、別の方法として、特開平6-232451号（以下、従来技術4という）には、 $In_xAl_{1-y}Ga_{(1-x-y)}N$, ($0 < x < 1$, $0 \leq y < 1$)で表されるIII族窒化物層を成長させた後に、Mgを 1×10^{17} cm⁻³～ 3×10^{20} cm⁻³の範囲でドーピングしてp型III族窒化物半導体を作製する方法が開示されている。

【0012】この方法は、 $In_xAl_{1-y}Ga_{(1-x-y)}N$, ($0 < x < 1$, $0 \leq y < 1$)層を緩衝層として用いることによって、その上に成長するp型GaN層の歪みを緩和して結晶性の悪化を防ぐことで、as-grownでp型GaNを作製するものである。この方法によれば、GaNにMgを 3×10^{20} cm⁻³ドーピングして、 5×10^{17} cm⁻³のキャリア濃度のp型GaNを作製している。

【0013】現在、以上のような方法で、p型III族窒化物半導体は作製されている。

【0014】高い電流密度を必要とする発光素子等に使用されるp型III族窒化物半導体には高いキャリア濃度が要求されるが、バンドギャップの広いIII族窒化物半導体は、前述したような方法でp型化してもキャリア濃度は低い。例えば、半導体レーザーのクラッド層に使用されるAlGaNでは、キャリア濃度が 10^{17} cm⁻³を超えるものを作製することは容易ではない。

【0015】これを解決する方法として、特開平10-101496号（以下、従来技術5という）には、MgとSiを2:1、あるいはMgとOを2:1、あるいはBeとSiを2:1、あるいはBeとOを2:1の比率でGaNに 10^{19} cm⁻³～ 10^{20} cm⁻³程度同時ドーピングして、高キャリア濃度のp型GaNを作製する方法が開示されている。

【0016】また、GaN/AlGaNの超格子構造により実効的なキャリア濃度を高める方法が提案されており、それをクラッド層に適用した半導体レーザーが作製されている。

【0017】図19は特開平11-4048号（以下、従来技術6という）に示されている半導体レーザーを示す図である。図19を参照すると、この半導体レーザーは、

サファイア基板上に選択成長とラテラル成長を組み合わせて成長したGaN厚膜をサファイア基板から分離して作製されたGaN基板160の上に、n型GaNより成る第2のバッファー層161、n型 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ より成るクラック防止層162、n型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ 超格子より成るn側クラッド層163、n型GaNより成るn側光ガイド層164、 $In_{0.05}Ga_{0.95}N/In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 多重量子井戸構造の活性層165、p型 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ より成るp側キャップ層166、p型GaNからなるp側光ガイド層167、p型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ 超格子より成るp側クラッド層168、p型GaNからなるp側コンタクト層169が順次に積層されて積層構造として形成されている。

【0018】そして、p側コンタクト層169、p側クラッド層168の一部をドライエッチングして、幅4μmのリジストライプを形成している。リジストライプ上にはp側電極170が形成され、n型GaN基板160の裏面には、n側電極171が形成されている。レーザー共振器端面はn型GaN基板160のM面をへき開することで形成されている。

【0019】ここで、p型クラッド層168は、キャリア濃度の高いGaNと $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ との超格子構造をとることによって、実効的なキャリア濃度を増加させている。

【0020】

【発明が解決しようとする課題】前述したように、低抵抗のp型III族窒化物半導体を作製することは難しいため、III族窒化物半導体を使用した、高輝度青色発光ダイオード、低出力（数mW）の紫色半導体レーザーしか実用化されておらず、その後の精力的な研究開発にもかかわらず、高出力動作する実用的な紫色レーザーや、400nmより短い紫外領域で発光する発光ダイオードや半導体レーザー、あるいは紫外波長領域に感度特性を有する実用的な受光素子は実用化されていない。

【0021】例えば、半導体レーザーの場合には、未だp型クラッド層の抵抗やp側オームミック電極の接触抵抗が高いために、動作電圧の増加や、大電流動作時の発熱を招き、高出力動作するものが実用化されていない。また、紫外波長領域で使用する発光素子あるいは受光素子の場合は、p型AlGaN層のAl組成比が大きくなるに従い、高抵抗化するため、紫外波長領域での発光素子や受光素子は実用化されていない。

【0022】また、実用化された低出力の紫色半導体レーザーも製造コストが高いものとなっている。

【0023】以下、従来技術の問題点を説明する。

【0024】従来技術1のIII族窒化物半導体のp型化法は、p型不純物を不活性化している水素を熱処理によって結晶外部へ排出させる方法のため、水素を含まない雰囲気、一般的には窒素ガス雰囲気で熱処理が行われる。しかしながら、この雰囲気においては、窒素分子か

らなる窒素ガスはIII族窒化物の生成原料にはならないために、700°Cを超える高温では結晶表面の分解が起り、表面抵抗が大きくなるなど、特性の劣化が生じる場合があった。これは、結晶表面に電極を形成する場合に、オーミック接触抵抗が大きくなる等の不具合が生じることがある。また、p型化の熱処理工程を必要とするため、製造工程の増加と熱処理設備が必要となり、工業的にコストがかかる。

【0025】また、従来技術3は、熱処理工程を必要としないので、コスト的には低くできるが、1000°C程度の結晶成長温度から室温までの降温を窒素ガスや不活性ガスのみの雰囲気で行うので、従来技術1と同様に、結晶表面の分解が起り、表面抵抗が大きくなるなど、特性の劣化が生じる場合があった。

【0026】また、従来技術2の低エネルギー電子線照射は、電子線の侵入深さが浅く、結晶表面近傍しかp型化できないことと、電子線を一度に照射できる面積が狭いために、ウエハー全面をp型化するには時間がかかり、工業的にコストがかかりすぎる。

【0027】また、従来技術4の方法、すなわち、 $I_{nx} A_1_x G_a_{(1-x-y)} N$, ($0 < x < 1$, $0 \leq y < 1$) で表されるIII族窒化物層を成長させた後にMgを $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲でドーピングしてp型GaNを作製する方法では、直上の結晶層の歪みが緩和され、p型特性を示すが、多層構造を形成する場合には、層厚が厚くなるに従い、その効果が薄れてしまう。そのため、デバイス設計の自由度が少ないという問題がある。さらに、AlGaNの場合には、as-grownでは高キャリア濃度のものは得られにくく、熱処理等の後処理がやはり必要である。

【0028】水素を含まない雰囲気での結晶成長方法に関しては、まず、MBE法では、高真空中で結晶成長を行うため窒素の解離による欠陥が形成される等、高品質な結晶成長が行いにくい。また、窒素の供給に課題があり、成長速度が遅く、MOCVD法ほどには量産には向いていない。

【0029】一方、MBE法と同様に水素を極力含まない雰囲気でMOCVD法により結晶成長を行った場合、本願の発明者によるGaNの実験では、表面の凹凸が激しいものしか成長できず、結晶性の良いものは成長できなかった。すなわち、水素を含まない雰囲気では高品質のp型GaNを成長できる条件が狭いと考えられる。

【0030】また、従来技術5の方法、すなわち、MgとSiを2:1、あるいはMgとOを2:1、あるいはBeとSiを2:1、あるいはBeとOを2:1の比率で、GaNに $10^{19} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度同時ドーピングして、高キャリア濃度のp型GaNを作製する方法では、ドーピング量を増やすに従い、表面モフォロジーが悪くなるため、半導体レーザーのような平坦な導波路構造を必要とするデバイスを作製するには難があつ

た。

【0031】また、従来技術6の半導体レーザでは、p型 $A_1_{0.2} G_a_{0.8} N / G_a N$ 超格子を使用してp型クラッド層のキャリア濃度を実効的に増加させているが、超格子構造を作製するための結晶成長プロセスと装置が必要となることから、結晶成長に要する時間と装置コストがかかり、半導体レーザーが高価なものとなる。

【0032】また、p型GaNのキャリア濃度が 10^{18} cm^{-3} 以下と十分高くないので、p型 $A_1_{0.2} G_a_{0.8} N / G_a N$ 超格子の実効キャリア濃度も高出力半導体レーザーを実用化するには十分とはいはず、キャリア濃度の高いp型AlGaNが必要とされる。

【0033】本発明は、上述した従来技術の問題点を解決することを目的としている。すなわち、従来よりもキャリア濃度が高くかつ高品質のIII族窒化物半導体およびその作製方法および半導体装置およびその作製方法を提供することを目的としている。

【0034】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するためには、請求項1記載の発明は、Mgが添加されたp型 $A_1_x G_a_{(1-x)} N$ ($0 \leq x \leq 1$)において、前記p型 $A_1_x G_a_{(1-x)} N$ ($0 \leq x \leq 1$)には、Mgと同時にBが添加されていることを特徴としている。

【0035】また、請求項2記載の発明は、請求項1記載のIII族窒化物半導体を含む半導体積層構造を有していることを特徴としている。

【0036】また、請求項3記載の発明は、請求項2記載の半導体装置において、p側オーミック電極を形成するコンタクト層に請求項1記載のIII族窒化物半導体を用いることを特徴としている。

【0037】また、請求項4記載の発明は、請求項2または請求項3記載の半導体装置において、該半導体装置は半導体発光素子であることを特徴としている。

【0038】また、請求項5記載の発明は、請求項4記載の半導体装置において、前記半導体発光素子は半導体レーザー素子であることを特徴としている。

【0039】また、請求項6記載の発明は、請求項4または請求項5記載の半導体装置において、前記半導体発光素子は、発光波長が400nm以下であることを特徴としている。

【0040】また、請求項7記載の発明は、請求項5記載の半導体装置において、半導体装置としての半導体レーザー素子は、請求項1記載のIII族窒化物半導体をクラッド層に用いた少なくとも1つのp-n接合を有していることを特徴としている。

【0041】また、請求項8記載の発明は、Mgと同時にBが添加されているp型 $A_1_x G_a_{(1-x)} N$ ($0 \leq x \leq 1$)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む冷却雰囲気で行うことの特徴としている。

【0042】また、請求項9記載の発明は、請求項8記載のIII族窒化物半導体の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料はNH₃であることを特徴としている。

【0043】また、請求項10記載の発明は、Mgと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、NH₃の冷却雰囲気で行なうことを特徴としている。

【0044】また、請求項11記載の発明は、Mgと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を含む半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む雰囲気で行なうことを特徴としている。

【0045】また、請求項12記載の発明は、請求項11記載の半導体装置の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料はNH₃であることを特徴としている。

【0046】また、請求項13記載の発明は、Mgと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を含む半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、NH₃の冷却雰囲気で行なうことを特徴としている。

【0047】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。本発明のIII族窒化物半導体は、Mg(マグネシウム)が添加されたp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)において、このp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)には、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されていることを特徴としている。

【0048】一般的に、p型III族窒化物半導体を作製する場合には、p型不純物を適量添加することで、そのキャリア濃度を制御して作製している。なお、p型不純物としては一般的にMgが使用される。

【0049】しかしながら、III族窒化物半導体中のp型不純物の活性化率は～1%と低いため、p型不純物を～10²⁰c m⁻³程度まで添加しても、p型GaNで、キャリア濃度は10¹⁸c m⁻³以下と低いものしか作製できていない。

【0050】さらに、AlGaN等のワイドギャップ半導体になると、キャリア濃度はさらに低下し、高抵抗化してしまう。

【0051】また、p型不純物のドーピング量が～10²⁰c m⁻³を超えると、表面モフォロジーが悪くなり、逆に高抵抗化してしまう。

【0052】Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)結晶に添加されたp型不純物(一般にはMgが使用)はGaあるいはAlを置換してIII族元素サイトを占める。

【0053】しかるに、MgはGa, Alに比較してサイズが大きいため、Mgが添加されたAlGaN結晶は、このサイズの違いによって、結晶全体が不安定になり、Mgには排除しようとする力が作用して、高濃度のMgはIII族原子サイトを占めることができなくなり、格子間位置に入り、その結果、ドナーとして働く。すなわち、キャリア濃度を高めようとして、高濃度にMgを添加すると、逆に、結晶性が悪化するとともに、キャリア濃度が減少してしまうため、高キャリア濃度のp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)は得られない。

【0054】これに対し、本発明のように、Mgと同時に、B(ボロン)を添加して結晶成長したAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)は、高濃度にMgを添加してもキャリア濃度の減少が起らず、高いキャリア濃度のものが得られる。

【0055】その理由は、Ga, Alに比較してサイズの小さいBがMgと同時に添加されることによって、Mgによる結晶の不安定化が緩和され、MgがIII族サイトに入ることが可能になり、その結果、従来にない高いキャリア濃度のp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)が得られると考えられる。

【0056】なお、Bの添加量は、10²⁰c m⁻³のオーダーであれば、AlGaNのバンドギャップや屈折率を大きく変化させることはないので、AlGaNとして取り扱うことができる。

【0057】また、本発明では、III族窒化物半導体の第1の作製方法として、Mgと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む冷却雰囲気で行なうようにしている。

【0058】ここで、冷却雰囲気としては、窒素、あるいは、不活性ガスと窒素原料との混合ガス、あるいは、これらに数%の水素を含む混合ガス、あるいは、窒素原料ガスのみ、あるいは、窒素原料ガスと水素の混合ガス雰囲気を使用することができる。

【0059】この第1の作製方法によれば、MgとBを同時に添加しての高キャリア濃度のAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)の結晶成長と、前述した窒素原料を含む雰囲気ガス中の冷却を組み合わせることで、従来難しかったAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)のp型結晶がas-grownで得られる。

【0060】as-grownでp型結晶が得られる理由としては、MgとBが同時に添加されたp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)は高キャリア濃度のものが成長していることと、結晶成長温度からの冷却を前述の冷却雰囲気で行なうことで、冷却雰囲気からの水素の結晶への拡散が抑制され、水素バシベーションによる高抵抗化が防止されるためと考えられる。Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)が単層、あるいは積層構造の最表面に結

晶成長される場合においては、さらに、冷却雰囲気に含まれる窒素原料が、Al_{1-x}Ga_xNの生成反応に寄与する原子状の窒素を生成するため、Al_{1-x}Ga_xN結晶表面からの窒素の解離が防止され、その結果、ドナー性欠陥となる窒素空孔の生成が抑制され、表面の高抵抗化が防止されて、低抵抗のp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)がas-grownで得られると考えられる。

【0061】また、冷却中の雰囲気ガス中に水素を含む場合には、結晶表面に吸着している未反応の有機原料や、有機物の水素によるクリーニング効果が期待できるので、表面の汚染による表面抵抗の増加が防止できる。これは従来技術では得られなかつた効果である。

【0062】また、窒素原料ガスとしては特に限定はしないが、NH₃等のその分解によって水素を発生する化合物を使用することによって、原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果（それによる水素の拡散抑制効果）と水素によるクリーニング効果が同時に得られる。

【0063】前述した従来技術1では、水素を発生する化合物や水素ガスを含む雰囲気中では、高抵抗化したII族窒化物から水素を排出させてp型化をすることは困難であるため、水素を含まない雰囲気中で熱処理を行っていたが、これに対し、本発明の作製方法では、結晶成長直後の低抵抗のp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)中への水素の拡散侵入を抑制することで、結晶成長後の冷却過程における高抵抗化を抑制し、低抵抗のp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)を作製することを特徴としており、従来技術とは原理的に異なるものである。また、雰囲気中には、水素を含んでいても、含んでいなくても良く、水素を含む場合には水素の効果を積極的に利用している点も従来技術とは異なる。

【0064】すなわち、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料としてはNH₃(アンモニア)を用いることができる。

【0065】窒素原料ガスとしてNH₃を使用するときには、その分解によって生成される原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果と水素によるクリーニング効果が同時に得られる。

【0066】また、本発明では、III族窒化物半導体の第2の作製方法として、Mgと同時にBが添加されているp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長して作製し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、NH₃の冷却雰囲気で行なうようにしている。

【0067】この第2の作製方法では、冷却中の雰囲気がNH₃ガスのみであるので、その分解によって生成される原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果と水素によるクリーニング効果を、混合ガス雰囲気の場合よりも効果的に得ることができる。

【0068】なお、従来、NH₃雰囲気中の熱処理では、水素バシベーションによりp型結晶が高抵抗化し、低抵抗のp型III族窒化物は得られなかつたが、本発明では、結晶成長後の冷却過程において、雰囲気をNH₃ガスとすることにより、表面劣化が抑制された低抵抗のp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)がas-grownで得られる。

【0069】また、本発明では、上述したIII族窒化物半導体(Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1))を含む半導体積層構造を有している半導体装置を構成することができる。

【0070】なお、このような半導体装置は、p型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)の特性を用いて機能するものであれば、任意の素子形態をとることができ。すなわち、半導体発光素子(例えば、半導体レーザー素子)、受光素子、電子デバイス等の形態をとができる。

【0071】具体的に、半導体発光素子として構成する場合、正負の2つの電極間に電圧を印加することによって、発光領域に電流を注入し、そこでキャリアの再結合が生じ発光するものであれば、その構造は特に限定しない。

【0072】すなわち、半導体発光素子としては、発光ダイオードであっても良いし、半導体レーザーであっても良い。また、半導体発光素子が例えば半導体レーザーである場合、この半導体レーザーの構造は特に限定されるものではなく、端面発光型、面発光型のどちらの構造であっても良い。

【0073】また、本発明の半導体装置が半導体発光素子である場合、この半導体発光素子としては、発光波長が400nm以下のものにすることができる。

【0074】より具体的に、本発明では、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)を含む半導体積層構造を有する半導体装置において、p側オーミック電極を形成するコンタクト層に、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)を用いることができる。

【0075】なお、このような半導体装置は、p型Al_{1-x}Ga_(1-x)N(0≤x≤1)にp側オーミック電極が形成され、電流を注入することにより機能するものであれば、任意の素子形態をとることができる。すなわち、半導体発光素子(例えば、半導体レーザー素子)、受光素子、電子デバイス等の形態をとることができる。

【0076】具体的に、半導体発光素子として構成する場合、正負の2つの電極間に電圧を印加することによって、発光領域に電流を注入し、そこでキャリアの再結合が生じ発光するものであれば、その構造は特に限定しない。

【0077】すなわち、半導体発光素子としては、発光ダイオードであっても良いし、半導体レーザーであっても良い。また、半導体発光素子が例えば半導体レーザーである場合、この半導体レーザーの構造は特に限定されるものではなく、端面発光型、面発光型のどちらの構造であっても良い。

【0078】また、本発明の半導体装置が半導体発光素子である場合、この半導体発光素子としては、発光波長が400nm以下のものにすることができる。

【0079】また、p型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を用いるコンタクト層(p側オミック電極を形成するコンタクト層)は、積層構造の最表面である必要はなく、例えば最下層であっても良い。

【0080】また、本発明では、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体積層構造を有している半導体装置が半導体レーザー素子である場合、該半導体レーザ素子を、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)をクラッド層に用いた少なくとも1つのp-n接合を有するものにすることができる。

【0081】ここで、半導体レーザー素子の構造は、特に限定されるものではない。すなわち、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)をクラッド層に用いた少なくとも1つのp-n接合を有するIII族窒化物半導体レーザー素子であって、活性層にキャリアが注入され、レーザー光が外部に取り出されるものであればよく、端面発光型、面発光型のどちらの構造であっても良い。

【0082】また、本発明では、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体装置の第1の作製方法として、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む冷却雰囲気で行うことによって、上述した半導体装置を作製することができる。

【0083】ここで、冷却雰囲気としては、窒素、あるいは、不活性ガスと窒素原料との混合ガス、あるいは、これらに数%の水素を含む混合ガス、あるいは、窒素原料ガスのみ、あるいは、窒素原料ガスと水素の混合ガス雰囲気を使用することができる。

【0084】この第1の作製方法によれば、MgとBを同時に添加しての高キャリア濃度の $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)の結晶成長と、前述した窒素原料を含む雰囲気ガス中での冷却を組み合わせることで、従来難しかった $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)のp型結晶がas-grownで得られる。

【0085】as-grownでp型結晶が得られる理

由としては、MgとBが同時に添加されたp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)は高キャリア濃度のものが成長していることと、結晶成長温度からの冷却を、前述の冷却雰囲気で行うことで、冷却雰囲気からの水素の結晶内への拡散が抑制され、水素バシベーションによる高抵抗化が防止されるためと考えられる。 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)が単層、あるいは積層構造の最表面に結晶成長される場合においては、さらに、冷却雰囲気に含まれる窒素原料が、 A_1GaN の生成反応に寄与する原子状の窒素を生成するため、 A_1GaN 結晶表面からの窒素の解離が防止され、その結果、ドナー性欠陥となる窒素空孔の生成が抑制され、表面の高抵抗化が防止されて、低抵抗のp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)がas-grownで得られると考えられる。

【0086】また、冷却中の雰囲気ガス中に水素を含む場合には、結晶表面に吸着している未反応の有機原料や、有機物の水素によるクリーニング効果が期待できるので、表面の汚染による表面抵抗の増加が防止できる。これは従来技術では得られなかった効果である。

【0087】また、窒素原料ガスとしては特に限定はしないが、 NH_3 等のその分解によって水素を発生する化合物を使用することによって、原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果(それによる水素の拡散抑制効果)と水素によるクリーニング効果が同時に得られる。

【0088】前述した従来技術1では、水素を発生する化合物や水素ガスを含む雰囲気中では、高抵抗化したII族窒化物から水素を排出させてp型化をすることは困難であるため、水素を含まない雰囲気中で熱処理を行っていたが、これに対し、本発明の作製方法では、結晶成長直後の低抵抗のp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)中への水素の拡散侵入を抑制することで、結晶成長後の冷却過程における高抵抗化を抑制し、低抵抗のp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を作製することを特徴としており、従来技術とは原理的に異なるものである。また、雰囲気中には、水素を含んでいても、含んでいなくても良く、水素を含む場合には水素の効果を積極的に利用している点も従来技術とは異なる。

【0089】すなわち、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体装置の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料としては NH_3 (アンモニア)を用いることができる。

【0090】窒素原料ガスとして NH_3 を使用するときには、その分解によって生成される原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果と水素によるクリーニング効果が同時に得られる。

【0091】また、本発明では、p型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体装置の第2の作製方法として、Mg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む

半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、N₂H₃の冷却雰囲気で行なうことによって、上述した半導体装置を作製することができる。

【0092】この第2の作製方法では、冷却中の雰囲気がN₂H₃ガスのみであるので、その分解によって生成される原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果と水素によるクリーニング効果を、混合ガス雰囲気の場合よりも効果的に得ることができる。

【0093】なお、従来、N₂H₃雰囲気中の熱処理では、水素バシベーションによりp型結晶が高抵抗化し、低抵抗のp型III族窒化物は得られなかつたが、本発明では、結晶成長後の冷却過程において、雰囲気をN₂H₃ガスとすることにより、表面劣化が抑制された低抵抗のp型A_{1-x}Ga_(1-x)N ($0 \leq x \leq 1$) がas-grownで得られる。

【0094】以下、本発明のIII族窒化物半導体およびその作製方法および半導体装置およびその作製方法について、より詳細に説明する。

【0095】図1は本発明に係るIII族窒化物半導体の一例を示す図である。図1を参照すると、サファイア基板10上には、低温GaNバッファー層11、III族窒化物半導体としてのp型A_{1-x}Ga_(1-x)N ($0 \leq x \leq 1$) 層12が順次に積層されている。

【0096】ここで、p型A_{1-x}Ga_(1-x)N ($0 \leq x \leq 1$) 層12は、例えばx=0.08のp型A_{1.08}Ga_{0.92}N層である。

【0097】そして、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層12には、p型不純物のMg(マグネシウム)と同時にB(ボロン)が含まれている。ここで、MgとBは、ともに $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度含まれている。

【0098】p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層12は、キャリア濃度が $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ で低抵抗のp型を示した。なお、Bを含まない場合は、キャリア濃度は $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であった。

【0099】また、図2、図3は本発明に係る半導体装置の一例を示す図である。図2、図3の半導体装置は、端面発光型発光ダイオードと端面受光型フォトダイオードとがモノリシックに集積化された受発光素子として構成されている。なお、図2は受発光素子の発光ダイオードの光出射端面に垂直な面での断面図であり、図3は発光ダイオードの光出射端面に平行な面での断面図である。

【0100】図2、図3を参照すると、発光ダイオードとフォトダイオードは概ね直方体の形状をしており、発光ダイオードの1つの光出射端面とフォトダイオードの受光端面とが向き合うように空間的に分離されて形成されている。

【0101】また、発光ダイオードとフォトダイオードは同一の積層構造からなっている。その積層構造は、サ

ファイア基板20上に、A1N低温バッファー層21、n型A_{1.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22、n型A_{1.07}Ga_{0.93}Nクラッド層23、In_{0.17}Ga_{0.83}N活性層24、p型A_{1.07}Ga_{0.93}Nクラッド層25、p型GaNコンタクト層26が順次に積層されて形成されている。

【0102】ここで、p型A_{1.07}Ga_{0.93}Nクラッド層25、p型GaNコンタクト層26には、p型ドーパントとしてのMgと同時に、B(ボロン)がドーピングされている。

【0103】発光ダイオードとフォトダイオードは、上記積層構造をp型GaNコンタクト層26の表面からn型A_{1.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22までエッチングすることで空間的に分離されている。そして、n型A_{1.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22の表面が露出し、露出したn型A_{1.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22上には、Ti/A1からなるn側オーム電極29が形成されている。また、発光ダイオードとフォトダイオードのp型GaNコンタクト層26上には、Ni/Auからなるp側オーム電極28が形成されている。

【0104】さらにオーム電極以外の部分には、SiO₂からなる絶縁保護膜27が堆積されている。そして、絶縁保護膜27上には、Ti/A1からなる配線電極30が形成されており、配線電極30は、発光ダイオードとフォトダイオードのそれぞれの、p側オーム電極28と電気的に接続されている。

【0105】発光ダイオードとフォトダイオードの側面は基板に対して概ね垂直に形成されている。そして、発光ダイオードとフォトダイオードの溝を介して向き合う側面が、それぞれ、光出射端面202と受光面203になる。また、発光ダイオードのフォトダイオードと向き合う側面と反対側の端面が外部へ光を出射する光出射端面201となる。

【0106】この集積型受発光素子は、発光ダイオードに順方向電流を注入し、フォトダイオードに逆バイアスを印加することによって動作する。すなわち、それぞれの素子のp側、n側オーム電極に順方向あるいは逆方向にバイアスを印加すると、発光ダイオードは2つの光出射端面201、202から光を出射する。そして、フォトダイオードに向いた光出射端面202から出射した光が、フォトダイオードの受光面203に入射し、その強度に対応した光起電力がフォトダイオードで発生し、外部に光電流として取り出される。フォトダイオードの光電流をモニターすることによって、発光ダイオードに注入する電流を調整し、光出力を制御することができる。なお、発光ダイオードに電流を注入して発光させると、発光のピーク波長は、約412nmであった。

【0107】次に、図2、図3の集積型受発光素子の作製工程例について説明する。なお、この作製工程例では、集積型受発光素子の積層構造はMOCVD法で結晶

成長して作製した。

【0108】この作製工程例では、まず、サファイア基板20を反応管にセットし、水素ガス中、1120°Cで加熱し、基板20の表面をクリーニングした。

【0109】次いで、温度を520°Cに下げ、成長雰囲気をNH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、TMAを流し、低温AlNバッファー21を堆積した。

【0110】次いで、温度を1070°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMA、SiH₄を組成にあわせて供給し、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22を3μmの厚さ、n型Al_{0.07}Ga_{0.93}Nクラッド層23を0.5μmの厚さに順次積層した。

【0111】次いで、水素ガスの供給を止め、雰囲気をNH₃と窒素の混合ガス雰囲気にし、温度を810°Cに下げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMIを供給し、In_{0.17}Ga_{0.83}N活性層24を50nmの厚さに成長した。

【0112】次いで、雰囲気をNH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、温度を1070°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMA、(Et₂Cp)₂MgおよびB₂H₆を組成にあわせて供給し、p型Al_{0.07}Ga_{0.93}Nクラッド層25を0.5μmの厚さ、p型GaNコンタクト層26を0.2μmの厚さに順次積層した。結晶成長終了後、p型層の低抵抗化のため、窒素雰囲気中で、750°Cで15分間の熱処理を行った。

【0113】次に、幅30μm、長さ50μmの矩形パターンを長さ方向に5μm離して2つ並べたパターンをレジストで形成した。このレジストパターンをマスクとして、ドライエッチングを行い、発光ダイオードとフォトダイオードになる高さ約1.5μmの直方体形状を形成するとともに、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22を露出させた。

【0114】次いで、絶縁保護膜27となるSiO₂を積層構造の表面に約0.5μmの厚さに堆積した。

【0115】次いで、p側オーム電極28を形成した。p側オーム電極28の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、発光ダイオードとフォトダイオードの上部に、レジストでヌキストライプパターンを形成した後、絶縁保護膜27をエッチングしてp型GaNコンタクト層26を露出させる。

【0116】次いで、p側オーム電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材をリフトオフして、発光ダイオードとフォトダイオードの上部にp側オーム電極パターンを形成した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型GaNコンタクト層26にp側オーム電極28を形成した。

【0117】次いで、n側オーム電極29と配線電極30とを形成した。n側オーム電極29と配線電極30の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、

n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22上部のSiO₂膜27上に、レジストで約100μm幅のヌキストライプパターンを形成した後、SiO₂膜27をエッチングしてn型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層22を露出させる。次に、レジストを除去し、再度レジストで、配線電極30とn側電極29のリフトオフパターンを形成する。次いで、n側オーム電極と配線電極材料であるTi/AIを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤中に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材料をリフトオフし、n側オーム電極と配線電極パターンを形成した。その後、窒素雰囲気で450°Cで熱処理し、n側オーム電極29を形成した。次いで、ダイシングを行い、集積型受光素子をチップに分離した。

【0118】また、図4は本発明に係る半導体装置の他の構成例を示す図であり、図4の例では、半導体装置はフォトダイオードとして構成されている。

【0119】図4を参照すると、このフォトダイオードは、サファイア基板40上に、低温GaNバッファー層41、n型GaNコンタクト層42、低温n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nバッファー層43、n型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層44、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45、AlNキャップ層46が順次に積層された積層構造を有している。

【0120】ここで、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45には、p型ドーパントとしてのMgと同時に、B(ボロン)がドーピングされている。

【0121】そして、上記積層構造をAlNキャップ層46からn型GaNコンタクト層42が露出するまでエッチングして、直径150μmのメサ構造が形成されている。

【0122】メサ構造上部のAlNキャップ層46は、その外周がリング状にエッチングされ、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45の表面が露出している。露出したp型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45の表面にはリング状のp側オーム電極48が形成されている。また、露出したn型GaNコンタクト層42にはn側オーム電極49が形成されている。

【0123】また、オーム電極48、49が形成されている部分以外の領域にはSiO₂絶縁保護膜47が形成されている。また、メサ構造側面とn型GaNコンタクト層42上のSiO₂絶縁保護膜47上には、p側オーム電極48から引き出された配線電極50が形成されている。

【0124】図4のフォトダイオードにおいて、メサ構造上部のリング状のp側オーム電極48で囲まれた部分が受光面300となる。このフォトダイオードに逆バイアスを印加し、受光面300に光を照射すると、光の強度に対応した光電流が流れる。図4のフォトダイオードは、346、1nmより短い波長での光センサーとして機能する。

【0125】次に、図4のフォトダイオードの作製工程例を説明する。まず、サファイア基板40を反応管にセットし、水素ガス中、1120°Cで加熱し、基板40の表面をクリーニングした。

【0126】次いで、温度を520°Cに下げ、雰囲気をNH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、TMGを流し、低温GaNバッファー層41を堆積した。

【0127】次いで、温度を1050°Cに上げ、TMGとSiH₄を供給し、n型GaNコンタクト層42を2μmの厚さに積層し、続いて、温度を600°Cに下げ、TMGとTMAとSiH₄を供給して、低温n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nバッファー層43を約50nmの厚さに堆積し、次いで、温度を1070°Cに上げ、TMGとTMAとSiH₄を供給して、n型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層44を1μmの厚さに積層した。

【0128】次いで、SiH₄の供給を止め、(EtCp)₂MgとB₂H₆を供給し、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45を0.5μmの厚さ、AlNキャップ層46を0.1μmの厚さに積層した。

【0129】結晶成長終了後、p型層の低抵抗化のため、窒素雰囲気中で、750°Cで15分間の熱処理を行った。

【0130】次に、内径130μm、外形145μmのリング状に開いたパターンをレジストで形成した。このレジストパターンをマスクとして、ドライエッチングを行い、AlNキャップ層46をエッチング除去し、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45の表面を露出した。

【0131】次いで、ドライエッチングで形成したリングパターン上に、レジストで直径150μmの円パターンを形成した。このレジストパターンをマスクとして、再びドライエッチングを行い、高さ約2μmのメサ形状を形成するとともに、n型GaNコンタクト層42を露出させた。

【0132】レジストマスクを除去した後、ウエハーをプラズマCVD装置にセットし、表面にSiO₂膜47を約0.5μm堆積した。

【0133】次いで、p側オーム電極48を形成した。p側オーム電極48の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、メサの上部にレジストでリング状のヌキパターンを形成した後、SiO₂膜47をリング状にウエットエッチングで抜き、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45を露出させる。次いで、p側オーム電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材をリフトオフして、メサ上部にp側オーム電極パターンを形成した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}N層45にp側オーム電極48を形成した。

【0134】次いで、n側オーム電極49と配線電極50とを形成した。n側オーム電極49と配線電極50の形成工程は次の通りである。まず、n型GaNコンタクト層42上部のSiO₂膜47上に、レジストでメサを囲む形状のヌキパターンを形成した後、SiO₂膜47をエッチングしてn型GaNコンタクト層42を露出させる。次に、レジストを除去し、再度レジストで、配線電極50とn側電極49のリフトオフパターンを形成する。次いで、n側オーム電極と配線電極材料であるTi/AIを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤中に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材料をリフトオフし、n側オーム電極49と配線電極50のパターンを形成した。その後、窒素雰囲気中、450°Cで熱処理し、n側オーム電極49を形成した。

【0135】また、図5は本発明に係る半導体装置の他の構成例を示す図であり、図5の例では、半導体装置は半導体レーザーとして構成されている。なお、図5は半導体レーザーの光出射方向に垂直な面での断面図である。

【0136】図5を参照すると、この半導体レーザーは、サファイア基板60上に、AlGaN低温バッファー層61、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62、n型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nクラッド層63、n型GaNガイド層64、In_{0.15}Ga_{0.85}N/In_{0.02}Ga_{0.98}N多重量子井戸活性層(2ペア)65、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層66、p型GaNガイド層67、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nクラッド層68、p型GaNコンタクト層69が順次に積層されて形成されている。

【0137】ここで、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層66、p型GaNガイド層67、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nクラッド層68、p型GaNコンタクト層69には、p型ドーパントとしてのMgと同時に、B(ボロン)がドーピングされている。

【0138】また、上記積層構造は、p型GaNコンタクト層69の表面からn型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62までエッチングされ、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62の表面が露出している。露出したn型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62上には、Ti/AIからなるn側オーム電極72が形成されている。

【0139】また、p型GaNコンタクト層69の表面からp型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nクラッド層68の途中までエッチングされ、電流狭窄リッジ構造400が形成されている。そして、リッジ構造400の最表面のp型GaNコンタクト層69上には、Ni/Auからなるp側オーム電極71が形成されている。

【0140】また、電極形成部以外は、絶縁保護膜70としてSiO₂が堆積されている。そして、絶縁保護膜70上にはp側電極から引き出された配線電極73が形成されている。

【0141】そして、積層構造と電流狭窄リッジ構造と概ね垂直に光共振器端面が形成されている。

【0142】この半導体レーザーの電極71, 72に順方向に電流を注入すると発光し、さらに電流を増加させるとレーザー発振する。発振波長は約409nmである。

【0143】次に、図5の半導体レーザーの作製工程例を説明する。なお、この作製工程例では、半導体レーザーの積層構造の結晶成長はMOCVD法で行った。

【0144】この作製工程例では、まず、サファイア基板60を反応管にセットし、水素ガス中、1120°Cで加熱し、基板60の表面をクリーニングした。

【0145】次いで、温度を520°Cに下げ、窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、TMGとTMAを流し、低温AlGaNバッファー層61を堆積した。

【0146】次いで、温度を1050°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG, TMI, SiH₄を組成にあわせて供給し、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62を2μmの厚さ、n型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nクラッド層63を0.7μmの厚さ、n型GaNガイド層64を0.1μmの厚さに積層した。

【0147】次いで、水素ガスの供給を止め、窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、温度を810°Cに下げ、水素をキャリアガスとしてTMG, TMIを供給し、In_{0.15}Ga_{0.85}N/In_{0.02}Ga_{0.98}N多重量子井戸活性層65(2ペア)を成長した。

【0148】次いで、成長雰囲気をNH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、温度を1070°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG, TMA, (EtCP)₂Mg, B₂H₆を組成にあわせて供給し、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層66を20nmの厚さ、p型GaNガイド層67を0.1μmの厚さ、p型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nクラッド層68を0.7μmの厚さ、p型GaNコンタクト層69を0.2μmの厚さに積層した。

【0149】結晶成長終了後、p型層の低抵抗化のため、窒素雰囲気中で、750°Cで15分間の熱処理を行った。

【0150】次いで、レジストで幅4μmのストライプパターンを繰り返しピッチ1mmで形成した。このレジストパターンをマスクとして、約0.7μmの深さをドライエッティングして、リッジ構造400を形成した。

【0151】レジストマスクを除去した後に、さらにレジストでリッジ構造400を覆う幅500μmのストライプパターンを繰り返しピッチ1mmで形成した。このレジストパターンをマスクとして、約1.5μmの深さにドライエッティングして、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62を露出させた。次いで、絶縁保護膜70となるSiO₂を積層構造の表面に約0.5μm堆積した。

【0152】次いで、p側オーム電極71を形成した。p側オーム電極71の形成工程は次の通りであ

る。すなわち、まず、リッジ構造400の上部に、レジストでヌキストライプパターンを形成した後、SiO₂膜70をエッティングしてリッジ上のp型GaNコンタクト層69を露出させる。次いで、レジストを除去し、再度レジストで約450μm幅のヌキストライプパターンを形成し、リッジ上にp側オーム電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材をリフトオフして、半導体レーザーの積層構造上にのみp側オーム電極パターンを形成した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型GaNコンタクト層69にp側オーム電極71を形成した。

【0153】次いで、n側オーム電極72と配線電極73とを形成した。n側オーム電極72と配線電極73の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62上部のSiO₂膜70上に、レジストで約100μm幅のヌキストライプパターンを形成した後、SiO₂膜70をエッティングしてn型Al_{0.03}Ga_{0.97}Nコンタクト層62を露出させる。レジストを除去した後、再びレジストを塗布して、p側電極上とn側オーム電極を形成する部分にリフトオフ用の電極パターンを形成する。次いで、n側オーム電極材料と配線電極材料であるTi/AIの蒸着を行い、ウエハーを有機溶剤中に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材料をリフトオフし、n側オーム電極パターンと配線電極パターンを形成する。その後、窒素雰囲気で450°Cで熱処理し、n側オーム電極72を形成した。

【0154】次いで、サファイア基板60を薄く研磨し、リッジ構造400に概ね垂直になるように割り、光共振器端面を形成する。

【0155】また、図6は前述の第1の作製方法で作製したIII族窒化物半導体(p型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1))の一例を説明するための図である。より詳細に、図6は本発明のp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。なお、この例では、p型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)はp型Al_{0.08}Ga_{0.92}Nであり、結晶成長後の冷却雰囲気に含まれる窒素原料はモノメチルヒドラジン(MMH_y)であるとしている。

【0156】図6を参照すると、まず、サファイア基板80をMOCVD装置にセットし、水素ガス中、1120°Cで加熱し、基板80の表面をクリーニングした。

【0157】次いで、温度を520°Cに下げ、窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、水素をキャリアガスとして、TMG(トリメチルガリウム)を流し、低温GaNバッファー層81を堆積した。

【0158】次いで、温度を1070°Cに上げ、III族原料としてTMG(トリメチルガリウム)とTMA(トリメチルアルミニウム)を、また、p型ドーパントとし

て $(\text{EtCp})_2\text{Mg}$ を、また、窒素原料としてモノメチルヒドラジン(MMH_y)を、さらにB₂H₆を窒素ガスと水素ガスの混合ガスと一緒に反応管に流し、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層82を結晶成長した。

【0159】結晶成長後に、III族原料とp型ドーパント原料とB₂H₆の供給を止め、水素ガス(全体の約6%)と窒素ガスとモノメチルヒドラジン(MMH_y)の混合ガス雰囲気中で室温まで冷却した。

【0160】冷却後、ウエハーを取り出し、結晶成長したA_{1.08}Ga_{0.92}N結晶82の表面に電極を形成してホール測定を行った。この結果、A_{1.08}Ga_{0.92}N層82のキャリア濃度は8×10¹⁷cm⁻³で低抵抗のp型を示した。

【0161】また、図7、図8は前述の第1の作製方法で作製した半導体装置の一例を説明するための図である。なお、図7、図8の例では、第1の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料はNH₃であるとしている。また、図7、図8の例では、半導体装置はフォトダイオードであり、図7はフォトダイオードの断面図、図8はフォトダイオードとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【0162】図7、図8を参照すると、このフォトダイオードは、n型GaN基板90上に、低温n型A_{1.01}Ga_{0.9}Nバッファー層91、n型A_{1.08}Ga_{0.92}N層92、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93、A1Nキャップ層94が順次に積層されて積層構造をなしている。

【0163】ここで、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93には、p型ドーパントとしてのMgとともに、B(ボロン)がドーピングされている。

【0164】また、図7を参照すると、A1Nキャップ層94は直径150μmの円形に残され、その周囲はエッチングされ、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93の表面が露出している。露出したp型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93の表面にはp側オーム電極95が形成されている。また、n型GaN基板90の裏面にはn側オーム電極96が形成されている。

【0165】図7のフォトダイオードでは、p側オーム電極95で囲まれた円形部分が受光面600となる。このフォトダイオードに逆バイアスを印加し、受光面600に光を照射すると光の強度に対応した光電流が流れる。図7のフォトダイオードは346.1nmよりも短い波長での光センサーとして機能する。

【0166】図7のフォトダイオードは、as-growでp型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93が作製されているので、p型化のための熱処理を必要としていない。その結果、結晶表面の分解がほとんどないので、結晶欠陥が発生せず、暗電流の少ないフォトダイオードとなっている。

【0167】次に、図7のフォトダイオードの作製方法を説明する。まず、n型GaN基板90を反応管にセッ

トし、水素と窒素とアンモニアガスの混合ガス中、1120°Cに加熱し、基板90の表面をクリーニングした。

【0168】次いで、温度を600°Cに下げ、NH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気で、TMAとTMGおよびn型ドーパントガスであるSiH₄ガスを流し、低温n型A_{1.01}Ga_{0.9}Nバッファー層91を約50nmの厚さに堆積し、次いで、温度を1070°Cに上げ、TMGとTMAとSiH₄を供給して、n型A_{1.08}Ga_{0.92}N層92を1μmの厚さに積層した。

【0169】次いで、SiH₄の供給を止め、(EtCp)₂MgとB₂H₆を供給し、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93を0.5μmの厚さ、A1Nキャップ層94を0.1μmの厚さに積層した。

【0170】次いで、TMG、(EtCp)₂Mg、B₂H₆の供給を停止し、反応管内を窒素とアンモニアと水素ガス(全体の6%)の混合ガス雰囲気にして室温まで冷却し、反応管から基板を取り出した。

【0171】次に、直径150μmの円形パターンをレジストで形成した。このレジストパターンをマスクとして、ドライエッティングを行い、マスクパターン以外のA1Nキャップ層94をエッティング除去した。

【0172】次いで、p側オーム電極95を形成した。p側オーム電極95の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、A1Nキャップ層94の円形パターン上にレジストで直径140μmの円形のパターンを形成した後、p側オーム電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、基板を有機溶剤に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材をリフトオフして、A1Nキャップ層94の電極材料を除去した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層93にp側オーム電極95を形成した。

【0173】次いで、基板90の裏面を研磨し、厚さを約100μmにした後、n側オーム電極材料であるTi/AIを蒸着した。その後、窒素雰囲気で450°Cで熱処理し、n側オーム電極96を形成した。

【0174】また、図9、図10は前述の第1の作製方法で作製した半導体装置の他の例を説明するための図である。なお、図9、図10の例では、第1の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料はNH₃であるとしている。また、図9、図10の例では、半導体装置はフォトダイオードであり、図9はフォトダイオードの断面図、図10はフォトダイオードとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【0175】図9、図10を参照すると、このフォトダイオードは、n型GaN基板100上に、低温n型A_{1.01}Ga_{0.9}Nバッファー層101、n型A_{1.08}Ga_{0.92}N層102、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層103が順次に積層されて積層構造をなしている。

【0176】ここで、p型A_{1.08}Ga_{0.92}N層103

には、p型ドーパントとしてのMgと同時に、B(ボロン)がドーピングされている。

【0177】また、このフォトダイオードは、p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103からn型GaN基板100が露出するまでエッチングして形成された直径150μmのメサ構造をなしている。

【0178】そして、メサ構造とエッチングによって露出されたn型GaN基板100上には、SiO₂絶縁膜104が形成されている。

【0179】メサ構造の上部のSiO₂絶縁膜104は、その外周がリング状にエッチングされ、p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103の表面が露出している。露出したp型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103の表面には、リング状のp側オーム電極105が形成されている。また、メサ構造の側面とエッチングによって露出したn型GaN基板100上のSiO₂絶縁保護膜104上には、p側オーム電極105から引き出された配線電極107が形成されている。

【0180】また、n型GaN基板100の裏面にはn側オーム電極106が形成されている。

【0181】図9のフォトダイオードでは、メサ構造上部のリング状のp側オーム電極105で囲まれた部分が受光面500となる。このフォトダイオードに逆バイアスを印加し、受光面500に光を照射すると、光の強度に対応した光電流が流れる。図9のフォトダイオードは、346nmよりも短い波長での光センサーとして機能する。

【0182】図9のフォトダイオードは、as-growでp型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103が作製されているので、p型化のための熱処理を必要としていない。その結果、結晶表面の分解がほとんどないので、結晶欠陥が発生せず、暗電流の少ないフォトダイオードとなっている。

【0183】次に、図9のフォトダイオードの作製方法を説明する。まず、n型GaN基板100を反応管にセットし、水素と窒素とアンモニアガスの混合ガス中、120°Cに加熱し、基板100の表面をクリーニングした。

【0184】次いで、温度を600°Cに下げ、NH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気で、TMAとTMGおよびn型ドーパントガスであるSiH₄ガスを流し、低温n型 $A_{1.01}Ga_{0.9}N$ バッファー層101を約50nmの厚さに堆積し、次いで、温度を1070°Cに上げ、TMGとTMAとSiH₄を供給して、n型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層102を1μmの厚さに積層した。

【0185】次いで、SiH₄の供給を止め、(EtCp)₂MgとB₂H₆を供給し、p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103を0.5μmの厚さに積層した。

【0186】次いで、TMG、(EtCp)₂Mg、B₂H₆の供給を停止し、反応管内を窒素とアンモニアと水

素ガス(全体の6%)の混合ガス雰囲気にして室温まで冷却し、反応管から基板を取り出した。

【0187】次いで、レジストで直径150μmの円パターンを形成した。このレジストパターンをマスクとして、ドライエッチングを行い、高さ約2μmのメサ形状を形成するとともに、n型GaN基板100を露出させた。

【0188】レジストマスクを除去した後、ウエハーをプラズマCVD装置にセットし、表面にSiO₂膜104を約0.5μmの厚さに堆積した。

【0189】次いで、p側オーム電極105を形成した。p側オーム電極105の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、メサの上部にレジストでリング状のヌキパターンを形成した後、SiO₂膜104をリング状にウエットエッチングで抜き、p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103を露出させる。次いで、p側オーム電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材をリフトオフして、メサ上部にp側オーム電極パターンを形成した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層103にp側オーム電極105を形成した。

【0190】次いで、配線電極107を形成した。配線電極107の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、レジストで、配線電極107のリフトオフパターンを形成する。次いで、配線電極材料であるTi/AIを蒸着した。その後、ウエハーを有機溶剤中に浸し、レジストを溶かしてレジスト上に蒸着された電極材料をリフトオフし、配線電極107を形成した。

【0191】次いで、n型電極106を基板100の裏面に形成した。すなわち、基板100の裏面にTi/AIを蒸着し、その後、窒素雰囲気中、450°Cで熱処理し、n側オーム電極106を形成した。

【0192】最後に、ダイシングを行い、フォトダイオードをチップ分離した。

【0193】また、図11、図12は前述した第2の作製方法で作製された半導体装置の一例を説明するための図である。なお、図11、図12の例では、半導体装置は端面発光型発光ダイオードであり、図11は端面発光型発光ダイオードの光出射端面に垂直な面での断面図、図12は端面発光型発光ダイオードとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【0194】図11、図12を参照すると、発光ダイオードは概ね直方体の形状をしており、発光ダイオードの一側面が光出射端面となっている。

【0195】また、発光ダイオードの積層構造は、n型GaN基板110上に、n型 $A_{1.07}Ga_{0.93}N$ 低温バッファー層111、n型 $A_{1.02}Ga_{0.8}N$ クラッド層112、 $A_{1.07}Ga_{0.93}N$ 活性層113、p型 $A_{1.02}Ga_{0.8}N$ クラッド層114、p型GaNコンタクト層

115が順次に積層されて形成されている。

【0196】ここで、p型 $A_{1.0.2}Ga_{0.8}N$ クラッド層114、p型GaNコンタクト層115には、p型不純物であるMgと同時にBが添加されている。

【0197】また、発光ダイオードのp型GaNコンタクト層115上には、Ni/Auからなるp側オーミック電極116が形成されている。

【0198】また、基板110の裏面には、Ti/A1からなるn側オーミック電極117が形成されている。

【0199】そして、この発光ダイオードの側面は基板110に対して垂直に形成されている。

【0200】この発光ダイオードは、p側、n側オーミック電極116、117に順方向のバイアスをかけると、発光ダイオードの一側面である光出射端面700から光が外部に出射される。この発光ダイオードの発光のピーク波長は、約350nmであった。

【0201】次に、図11の発光ダイオードの作製方法を説明する。なお、発光ダイオードの積層構造はMOCVD法で結晶成長して作製した。まず、n型GaN基板110を反応管にセットし、アンモニアガス中、1120°Cで加熱し、基板110の表面をクリーニングした。

【0202】次いで、温度を600°Cに下げ、窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、TMAとTMGおよびn型ドーパントガスであるSiH₄ガスを流し、n型低温 $A_{1.0.07}Ga_{0.93}N$ バッファー層111を堆積した。

【0203】次いで、温度を1070°Cに上げ、TMG、TMAおよびn型不純物ガスとしてSiH₄を組成にあわせて供給し、n型 $A_{1.0.2}Ga_{0.8}N$ クラッド層112を0.3μmの厚さ、 $A_{1.0.07}Ga_{0.93}N$ 活性層113を0.05μmの厚さに積層した。

【0204】次いで、n型不純物原料の代わりに、p型不純物原料である(EtCp)₂Mgとそれと同時にB₂H₆を組成にあわせて供給し、p型 $A_{1.0.2}Ga_{0.8}N$ クラッド層114を0.3μmの厚さ、p型GaNコンタクト層115を0.2μmの厚さに積層した。

【0205】結晶成長終了後、反応管内をアンモニアガスのみの雰囲気にして成長温度から室温まで冷却した。

【0206】冷却後、積層構造表面にテスターを充てると、導通が有り、表面のp型GaNコンタクト層115が低抵抗であることが確認された。

【0207】次いで、p側オーミック電極材料であるNi/Auを積層構造上面に蒸着した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型GaNコンタクト層115にp側オーミック電極116を形成した。

【0208】次いで、GaN基板110の裏面を研磨し、約100μmの厚さにした。そして、GaN基板110の裏面にn側オーミック電極材料であるTi/A1を蒸着し、窒素雰囲気で450°Cで熱処理して、n側オーミック電極117を形成した。

【0209】次いで、基板をへき開して、出射端面700の形成とチップ分離を行った。

【0210】また、図13、図14、図15は前述した第2の作製方法で作製された半導体装置の他の例を説明するための図である。なお、図13、図14、図15の例では、半導体装置は半導体レーザーであり、図13は半導体レーザーの斜視図、図14は半導体レーザーの光出射方向に垂直な面での断面図、図15は半導体レーザーとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【0211】図13乃至図15を参照すると、半導体レーザーの積層構造1000は、n型GaN基板120上に、n型 A_1GaN 低温バッファー層121、n型 $A_{1.0.03}Ga_{0.97}N$ 高温バッファー層122、n型 $A_{1.0.07}Ga_{0.93}N$ クラッド層123、n型GaNガイド層124、I $n_{0.15}Ga_{0.85}N/I n_{0.02}Ga_{0.98}N$ 多重量子井戸活性層125、p型 $A_{1.0.2}Ga_{0.8}N$ 層126、p型GaNガイド層127、p型 $A_{1.0.07}Ga_{0.93}N$ クラッド層128、p型GaNコンタクト層129が順次に積層されて形成されている。

【0212】そして、p型 $A_{1.0.2}Ga_{0.8}N$ 層126、p型GaNガイド層127、p型 $A_{1.0.07}Ga_{0.93}N$ クラッド層128、p型GaNコンタクト層129には、p型不純物であるMgと同時にBがドーピングされている。

【0213】積層構造1000は、p型GaNコンタクト層129の表面からp型 $A_{1.0.07}Ga_{0.93}N$ クラッド層128の途中までエッチングされ、電流狭窄リッジ構造800が形成されている。

【0214】そして、リッジ構造800の最表面のp型GaNコンタクト層129上には、Ni/Auからなるp側オーミック電極131が形成されている。また、p側電極形成部以外は、絶縁保護膜130として、SiO₂が堆積されている。

【0215】そして、積層構造1000と電流狭窄リッジ構造800と概ね垂直に光共振器端面801、802が形成されている。

【0216】また、GaN基板120の裏面には、Ti/A1からなるn側オーミック電極132が形成されている。

【0217】この半導体レーザーの電極131、132に順方向に電流を注入すると発光し、さらに電流を増加させるとレーザー発振した。発振波長は約409nmであった。

【0218】次に、図13、図14の半導体レーザーの作製方法を説明する。なお、半導体レーザーの積層構造1000の結晶成長はMOCVD法で行った。まず、n型GaN基板120を反応管にセットし、水素と窒素とアンモニアガスの混合ガス中、1120°Cに加熱し、基板120の表面をクリーニングした。

【0219】次いで、温度を600°Cに下げ、NH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気で、TMAとTMGおよびn型ドーパントガスであるSiH₄ガスを流し、n型低温AlGaNバッファー層121を堆積した。

【0220】次いで、温度を1070°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMA、n型不純物ガスとしてSiH₄を組成にあわせて供給し、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}N高温バッファー層122を1μmの厚さ、n型Al_{0.07}Ga_{0.93}Nクラッド層123を0.5μmの厚さ、n型GaNガイド層124を0.1μmの厚さに積層した。

【0221】次いで、水素ガスの供給を止め、雰囲気をNH₃と窒素の混合ガス雰囲気にし、温度を810°Cに下げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMIを供給し、In_{0.15}Ga_{0.85}N/In_{0.02}Ga_{0.98}N多重量子井戸活性層125(2ペア)を成長した。

【0222】次いで、成長雰囲気をNH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気にし、温度を1070°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMA、p型不純物原料の(EtCp)₂Mg、B₂H₆を組成にあわせて供給し、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層126を20nmの厚さ、p型GaNガイド層127を0.1μmの厚さ、p型Al_{0.07}Ga_{0.93}Nクラッド層128を0.5μmの厚さ、p型GaNコンタクト層129を0.2μmの厚さに積層した。

【0223】結晶成長終了後、反応管内をアンモニアガスのみの雰囲気にして成長温度から室温まで冷却した。

【0224】冷却後、積層構造表面にテスターを充てると、導通が有り、表面のp型GaNコンタクト層129が低抵抗であることが確認された。

【0225】次いで、レジストで幅4μmのストライプパターンを繰り返しピッチ300μmで形成し、このレジストパターンをマスクとして、約0.7μmの深さをドライエッチングして、リッジ構造800を形成した。

【0226】かかる後、レジストマスクを除去し、その後、絶縁保護膜130となるSiO₂を積層構造の表面上に約0.5μmの厚さに堆積した。

【0227】次いで、p側オーム電極131を形成した。p側オーム電極131の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、リッジ構造800の上部に、レジストでヌキストライプパターンを形成した後、SiO₂絶縁保護膜130をエッチングしてリッジ800上のp型GaNコンタクト層129を露出させる。次いで、レジストを除去し、ウエハー表面にp側オーム電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型GaNコンタクト層129にp側オーム電極131を形成した。

【0228】次いで、基板120の裏面を研磨し、厚さを約100μmにした後、基板120の裏面にn側オーム電極材料であるTi/AIを蒸着した。その後、

窒素雰囲気で450°Cで熱処理し、n側オーム電極132を形成した。

【0229】次いで、半導体レーザー構造が形成されたウエハーをリッジ800に概ね垂直になるようにへき開し、光共振器端面801, 802を形成した。

【0230】また、図16、図17、図18は前述した第2の作製方法で作製された半導体発光素子の一例を説明するための図である。なお、図16、図17、図18の例では、半導体発光素子は半導体レーザであり、図16は半導体レーザーの斜視図、図17は半導体レーザーの光出射方向に垂直な面での断面図、図18は半導体レーザーとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【0231】図16乃至図18を参照すると、半導体レーザーの積層構造2000は、n型GaN基板140上に、n型AlGaN低温バッファー層141、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}N高温バッファー層142、n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層143、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nガイド層144、GaN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N多重量子井戸活性層145、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層146、p型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nガイド層147、p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層148、p型GaNコンタクト層149が順次に積層されて形成されている。

【0232】そして、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層146、p型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nガイド層147、p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層148、p型GaNコンタクト層149には、p型不純物であるMgと同時にBがドーピングされている。

【0233】積層構造2000は、p型GaNコンタクト層149の表面からp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層148の途中までエッチングされ、電流狭窄リッジ構造900が形成されている。

【0234】そして、リッジ構造900の最表面のp型GaNコンタクト層149上には、Ni/Auからなるp側オーム電極151が形成されている。また、p側電極形成部以外は、絶縁保護膜150として、SiO₂が堆積されている。

【0235】そして、積層構造2000と電流狭窄リッジ構造900と概ね垂直に光共振器端面901, 902が形成されている。

【0236】また、GaN基板140の裏面には、Ti/AIからなるn側オーム電極152が形成されている。

【0237】この半導体レーザーの電極151, 152に順方向に電流を注入すると発光し、さらに電流を増加させるとレーザー発振した。発振波長は約365nmであった。

【0238】次に、図16、図17の半導体レーザーの作製方法を説明する。なお、半導体レーザーの積層構造2000の結晶成長はMOCVD法で行った。まず、n

型GaN基板140を反応管にセットし、水素と窒素とアンモニアガスの混合ガス中、1120°Cに加熱し、基板140の表面をクリーニングした。

【0239】次いで、温度を600°Cに下げ、NH₃と窒素と水素の混合ガス雰囲気で、TMAとTMGおよびn型ドーパントガスであるSiH₄ガスを流し、n型低温AlGaNバッファー層141を堆積した。

【0240】次いで、温度を1070°Cに上げ、水素をキャリアガスとしてTMG、TMA、n型不純物ガスとしてSiH₄を組成にあわせて供給し、n型Al_{0.03}Ga_{0.97}N高温バッファー層142を1μmの厚さ、n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層143を0.5μmの厚さ、n型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nガイド層144を0.1μmの厚さに順次積層し、次いで、GaN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N多重量子井戸活性層145(3ペア)を積層した。

【0241】次いで、TMG、TMA、p型不純物原料の(EtCp)₂Mg、B₂H₆を組成にあわせて供給し、p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層146を20nmの厚さ、p型Al_{0.1}Ga_{0.9}Nガイド層147を0.1μmの厚さ、p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層148を0.5μmの厚さ、p型GaNコンタクト層149を0.2μmの厚さに順次積層した。

【0242】結晶成長終了後、反応管内をアンモニアガスのみの雰囲気にして成長温度から室温まで冷却した。

【0243】冷却後、積層構造表面にテスターを充てると、導通が有り、表面のp型GaNコンタクト層149が低抵抗であることが確認された。

【0244】次いで、レジストで幅4μmのストライプパターンを繰り返しピッチ300μmで形成し、このレジストパターンをマスクとして、約0.7μmの深さをドライエッキングして、リッジ構造900を形成した。

【0245】かかる後、レジストマスクを除去し、その後、絶縁保護膜150となるSiO₂を積層構造の表面上に約0.5μmの厚さに堆積した。

【0246】次いで、p側オーミック電極151を形成した。p側オーミック電極151の形成工程は次の通りである。すなわち、まず、リッジ構造900の上部に、レジストでヌキストライプパターンを形成した後、SiO₂絶縁保護膜150をエッティングしてリッジ900上のp型GaNコンタクト層149を露出させる。次いで、レジストを除去し、ウエハー表面にp側オーミック電極材料であるNi/Auを蒸着した。その後、窒素雰囲気中、600°Cで熱処理し、p型GaNコンタクト層149にp側オーミック電極151を形成した。

【0247】次いで、基板140の裏面を研磨し、厚さを約100μmにした後、基板140の裏面にn側オーミック電極材料であるTi/AIを蒸着した。その後、窒素雰囲気で450°Cで熱処理し、n側オーミック電極152を形成した。

【0248】次いで、半導体レーザー構造が形成された

ウエハーをリッジ900に概ね垂直になるようにべき開し、光共振器端面901、902を形成した。

【0249】

【発明の効果】以上に説明したように、請求項1記載の発明によれば、Mgが添加されたp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)において、前記p型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)には、Mgと一緒にBが添加されているので、Mgの添加による結晶の不安定化が緩和され、高濃度にMgを添加してもキャリア濃度の減少が起らず、その結果、従来にない高いキャリア濃度のp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を得ることができる。

【0250】また、請求項2記載の発明によれば、請求項1記載のIII族窒化物半導体を含む半導体積層構造を有しているので、従来III族窒化物半導体積層構造からなる半導体装置の抵抗の増大の原因となっていたp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)のキャリア濃度が高く低抵抗であることにより、動作電圧が低く、発熱しにくい等、半導体装置の特性が向上し信頼性を高めることができる。

【0251】特に、半導体装置が受光素子の場合には、低抵抗のワイドギャップのp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を使用できるので、従来よりも短い波長領域(紫外領域)で動作する受光素子となる。また、半導体装置が発光素子の場合には、従来よりも短波長の領域で発光する発光素子となる。

【0252】また、請求項3記載の発明によれば、請求項2記載の半導体装置において、p側オーミック電極を形成するコンタクト層に請求項1記載のIII族窒化物半導体を用いるので、従来III族窒化物半導体積層構造からなる半導体装置の抵抗の増大の原因となっていたp側オーミック電極の接触抵抗が低減され、動作電圧が低く、発熱による電極破壊が生じにくい等、半導体装置の特性が向上し信頼性を高めることができる。

【0253】また、請求項4記載の発明によれば、請求項2または請求項3記載の半導体装置において、該半導体装置は半導体発光素子であり、高いキャリア濃度のp型AlGaNが半導体発光素子に使用されているので、素子抵抗が従来のものよりも低く、これによって、高出力動作を行っても発熱が少なく、素子の劣化が少ない。また、p型AlGaNはas-grownでp型特性を示すので、p型化のための特別な処理にかかる時間と費用が必要とされない。従って、従来よりも動作電圧が低く、高出力、長寿命、高信頼性で低コストの半導体発光素子を提供できる。

【0254】また、請求項5記載の発明によれば、請求項4記載の半導体装置において、前記半導体発光素子は半導体レーザー素子であり、高いキャリア濃度のp型AlGaNを半導体レーザーに使用しているので、素子抵抗が従来のものよりも低く、これによって、高出力動作を行っても発熱が少なく、素子の劣化を少なくすること

ができる。

【0255】また、従来のIII族窒化物半導体レーザーは、p型AlGaNクラッド層のキャリア濃度が低いため、電子が活性層からp型クラッド層にオーバーフローし、発光効率の低下を招いていたが、本発明の半導体レーザーは、高いキャリア濃度のp型AlGaN層をクラッド層に使用することができるので、発光効率が高い。

【0256】さらに、p型AlGaNはas-grownでp型特性を示すので、p型化のための特別な処理にかかる時間と費用が必要とされない。従って、従来よりも動作電圧が低く、高出力、長寿命、高信頼性で低コストの半導体レーザーを提供できる。

【0257】また、請求項6記載の発明によれば、請求項4または請求項5記載の半導体装置において、前記半導体発光素子は、発光波長が400nm以下であり、p型AlGaNクラッド層にAlの混晶組成比が大きく、高いキャリア濃度のp型AlGaNを使用することができるので、従来では困難であった400nm以下の波長域での高効率の発光が実現できる。

【0258】また、請求項7記載の発明によれば、請求項5記載の半導体装置において、半導体装置としての半導体レーザー素子は、請求項1記載のIII族窒化物半導体をクラッド層に用いた少なくとも1つのp-n接合を有しており、従来のIII族窒化物半導体レーザー素子よりもキャリア濃度の高いp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)をp型クラッド層に使用しているので、動作電圧の低い、高出力、長寿命、高信頼性の半導体レーザー素子を提供できる。また、超格子構造を作製する必要がなくなるので、結晶成長に要する時間と装置コストを低減することが可能となり、低成本の半導体レーザー素子を提供できる。

【0259】また、請求項8記載の発明によれば、Mgと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む冷却雰囲気で行うようになっており、MgとBを同時に添加しての高キャリア濃度のAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)の結晶成長と、窒素原料を含む雰囲気ガス中の冷却とを組み合わせることで、従来難しかったAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)のas-grownでのp型結晶が得られる。

【0260】また、請求項9記載の発明によれば、請求項8記載のIII族窒化物半導体の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料はNH₃であるので、請求項8の作用効果に加えて、NH₃の分解によって生成される水素によって、結晶表面に吸着している未反応の有機原料や、有機物の水素によるクリーニング効果が期待でき、表面の汚染による表面抵抗の増加を防止できる。

【0261】また、請求項10記載の発明によれば、M

gと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、NH₃の冷却雰囲気で行なうようになっており、冷却雰囲気がNH₃ガスであるので、その分解によって生成される原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果と水素によるクリーニング効果を、混合ガス雰囲気の場合よりも効果的に得ることができ、その結果、従来よりも高いキャリア濃度のp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)をas-grownで作製できる。

【0262】また、請求項11記載の発明によれば、Mgと同時にBが添加されているp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)を含む半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、窒素原料を含む雰囲気で行なうようになっており、MgとBを同時に添加しての高キャリア濃度のAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)の結晶成長と、窒素原料を含む雰囲気ガス中の冷却とを組み合わせることで、従来難しかったAl_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)のas-grownでのp型結晶が得られる。

【0263】Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)が単層、あるいは積層構造の最表面に結晶成長される場合においては、冷却雰囲気に含まれる窒素原料が、AlGaNの生成反応に寄与する原子状の窒素を生成するため、AlGaN結晶表面からの窒素の解離が防止され、その結果、ドナー性欠陥となる窒素空孔の生成が抑制され、表面の高抵抗化が防止される。

【0264】窒素原料による分解の抑制は、p型AlGaNだけではなく、他のIII族窒化物結晶にも効果があるので、半導体装置を構成するIII族窒化物積層構造の最表面の熱分解による劣化が防止され、結晶品質の良い結晶を半導体装置に使用することができる。従って、従来よりも電気的特性が優れ、高信頼性の半導体装置を作製することができる。

【0265】また、p型化のための熱処理を必要としないため、半導体装置の作製工程を簡略化できるとともに、熱処理の設備費とエネルギー消費を削減できるので、低成本で半導体装置を作製することができる。

【0266】また、請求項12記載の発明によれば、請求項11記載の半導体装置の作製方法において、冷却雰囲気中に含まれる窒素原料はNH₃であるので、請求項8の作用効果に加えて、NH₃の分解によって生成される水素によって、結晶表面に吸着している未反応の有機原料や、有機物の水素によるクリーニング効果が期待でき、表面の汚染による表面抵抗の増加を防止できる。

【0267】従って、従来よりも高いキャリア濃度のp型Al_xGa_(1-x)N(0≤x≤1)をas-grownで作製できるとともに、従来よりも電気的特性が優れ、高信頼性の半導体装置を低成本で作製することができる。

【0268】また、請求項13記載の発明によれば、Mgと同時にBが添加されているp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)を含む半導体積層構造を、水素ガスを含む反応系で結晶成長し、その結晶成長直後の結晶成長温度からの冷却を、NH₃の冷却雰囲気で行なうようになっており、冷却雰囲気がNH₃ガスであるので、その分解によって生成される原子状窒素による結晶表面の分解抑制効果と水素によるクリーニング効果を、混合ガス雰囲気の場合よりも効果的に得ることができ、その結果、従来よりも高いキャリア濃度のp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)をas-grownで作製できる。これにより、従来よりも電気的特性が優れ、高信頼性の半導体装置を低コストで作製することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るIII族窒化物半導体の一例を示す図である。

【図2】本発明に係る半導体装置の一例を示す図である。

【図3】本発明に係る半導体装置の一例を示す図である。

【図4】本発明に係る半導体装置の他の構成例を示す図である。

【図5】本発明に係る半導体装置の他の構成例を示す図である。

【図6】本発明のp型 $A_{1-x}Ga_{(1-x)}N$ ($0 \leq x \leq 1$)の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【図7】フォトダイオードの一例を示す図である。

【図8】図7のフォトダイオードとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【図9】フォトダイオードの一例を示す図である。

【図10】図9のフォトダイオードとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【図11】端面発光型発光ダイオードの一例を示す図である。

【図12】図11の端面発光型発光ダイオードとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【図13】半導体レーザーの一例を示す斜視図である。

【図14】図13の半導体レーザーの光出射方向に垂直な面での断面図である。

【図15】図13、図14の半導体レーザーとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

【図16】半導体レーザーの一例を示す斜視図である。

【図17】図16の半導体レーザーの光出射方向に垂直な面での断面図である。

【図18】図16、図17の半導体レーザーとなる積層構造の結晶成長後の冷却過程を説明するための図である。

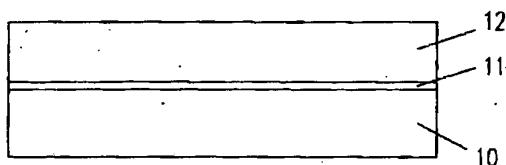
【図19】従来の半導体レーザーを示す図である。

【符号の説明】

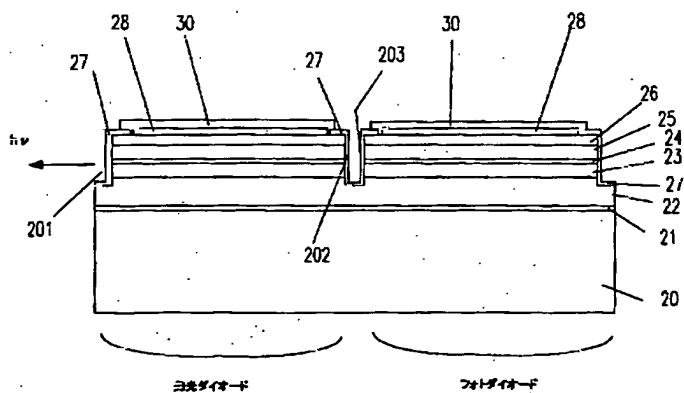
10, 20, 40, 60, 80	サファイア基板
11, 41, 81	低温GaNバッファー層
12, 82	p型 $A_{0.08}Ga_{0.92}N$ 層
21,	低温 A_1N バッファー層
22, 62	n型 $A_{1.03}Ga_{0.97}N$ コンタクト層
23, 123	n型 $A_{1.07}Ga_{0.93}N$ クラッド層
24	In _{0.17} Ga _{0.83} N活性層
25, 128	p型 $A_{1.07}Ga_{0.93}N$ クラッド層
26, 69, 115, 129, 149	p型GaNコンタクト層
27, 47, 70, 104, 130, 150	SiO ₂ からなる絶縁保護膜
28, 48, 71, 95, 105, 116, 131, 151, 170	p側オーミック電極
29, 49, 72, 96, 106, 117, 132, 152, 171	n側オーミック電極
30, 50, 73, 107	配線電極
42	n型GaNコンタクト層
43	低温n型 $A_{1.01}Ga_{0.9}N$ バッファー層
44, 92, 102	n型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層
45, 93, 103	p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ 層
46, 94	A1Nキャップ層
61	A1GaN低温バッファー層
63	n型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ クラッド層
64, 124, 164	n型GaNガイド層
65, 125	In _{0.15} Ga _{0.85} N / In _{0.02} Ga _{0.98} N多重量子井戸活性層(2ペア)
66, 126	p型 $A_{1.02}Ga_{0.8}N$ 層
67, 127, 167	p型GaNガイド層
68	p型 $A_{1.08}Ga_{0.92}N$ クラッド層
90, 100, 110, 120, 140, 160	n型GaN基板
91, 101	低温n型 $A_{1.01}Ga_{0.9}N$ バッファー層
111	n型 $A_{1.07}Ga_{0.93}N$ 低温バッファー層
112	n型 $A_{1.02}Ga_{0.8}N$ クラッド層
113	A _{1.07} Ga _{0.93} N活性層
114	p型 $A_{1.02}Ga_{0.8}N$ クラッド層
121, 141	n型A1GaN低温バッファー層
122, 142	n型 $A_{1.03}Ga_{0.97}N$ 高温

バッファー層		165	$In_{0.05}Ga_{0.95}N / In_{0.2}Ga_{0.8}$
143	n型 $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ クラッド層	N多重量子井戸構造の活性層	
144	n型 $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ ガイド層	166	p型 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ キャップ層
145	$GaN / Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ 多重量子井	168	p型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ 超格子
戸活性層		クラッド層	
146	p型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 層	169	p型 GaN コンタクト層
147	p型 $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ ガイド層	201, 202, 700	光出射端面
148	p型 $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ クラッド層	203, 300, 500, 600	受光面
161	n型 GaN より成る第2のバッファー	400, 800, 900	電流狭窄リッジ構造
層		401, 402, 801, 802, 901, 902	
162	n型 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ クラック防止層	光共振器端面	
163	n型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N / GaN$ 超格子	1000, 2000	半導体レーザーの積層構
より成るクラッド層		造	

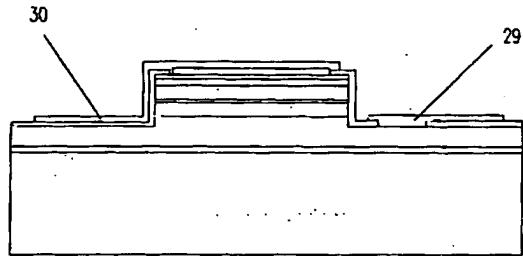
【図1】



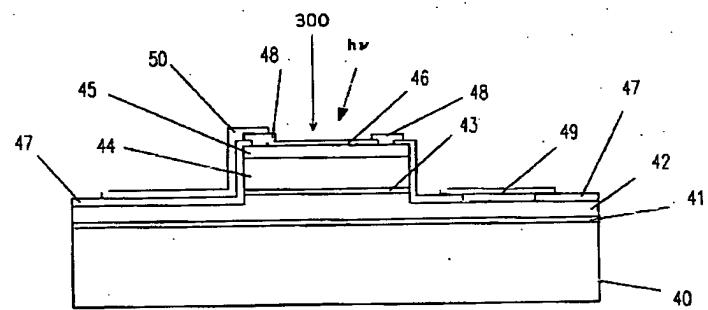
【図2】



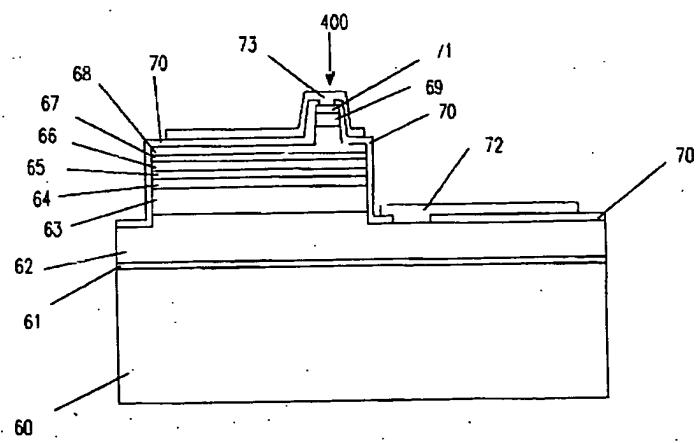
【図3】



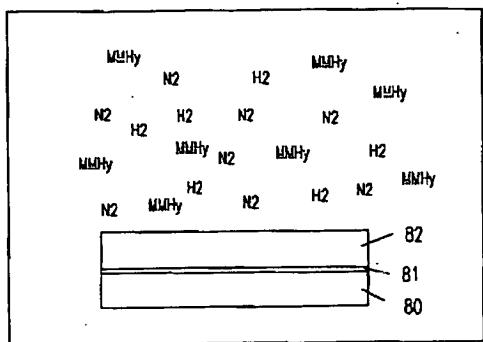
【図4】



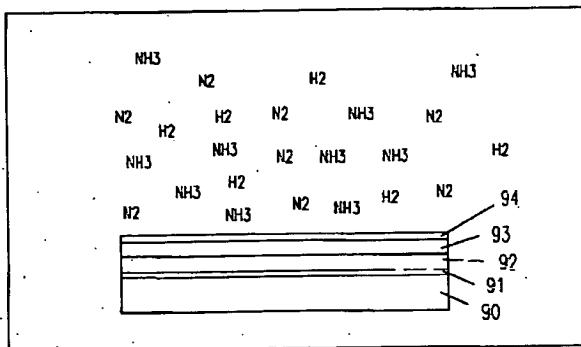
【図5】



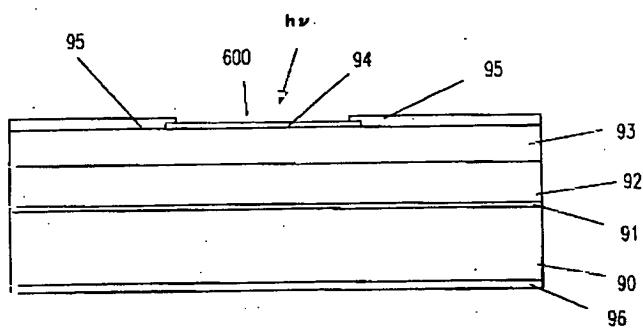
【図6】



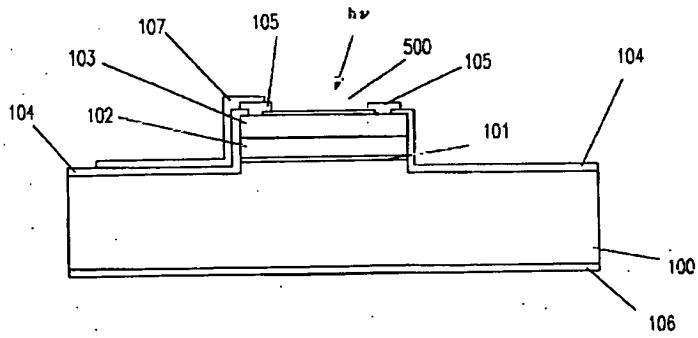
【図8】



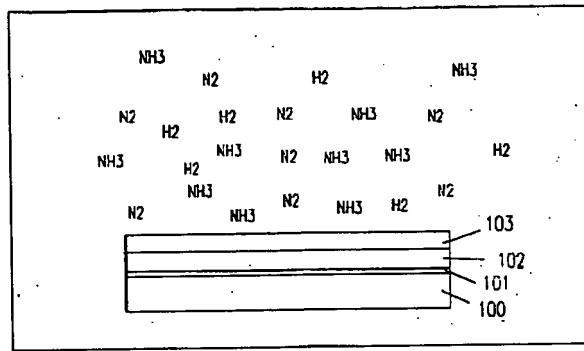
【図7】



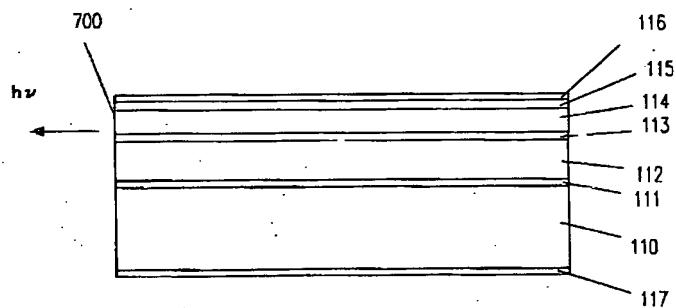
【図9】



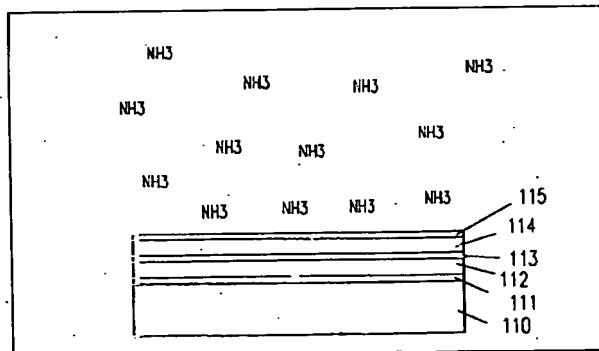
【図10】



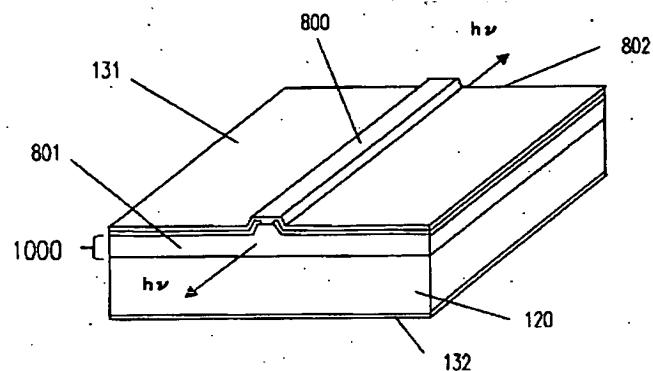
【図11】



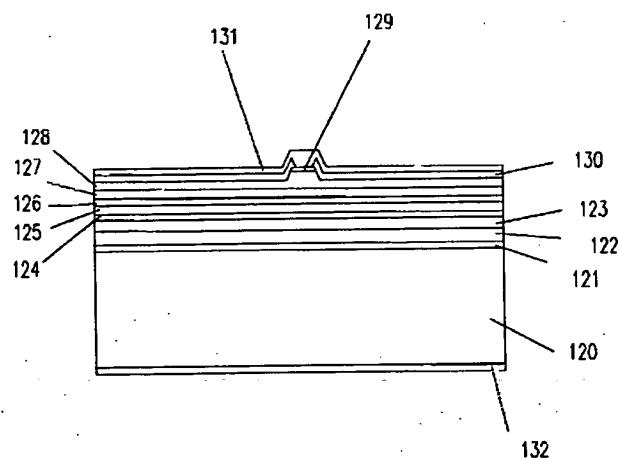
【図12】



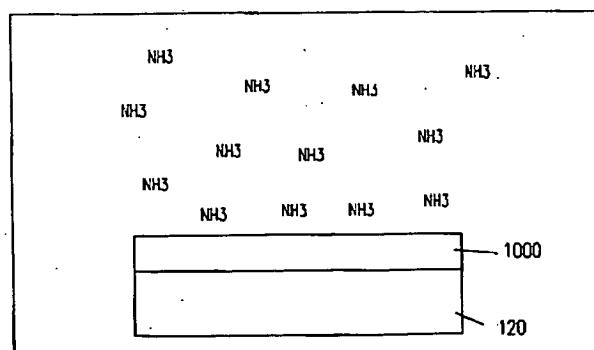
【図13】



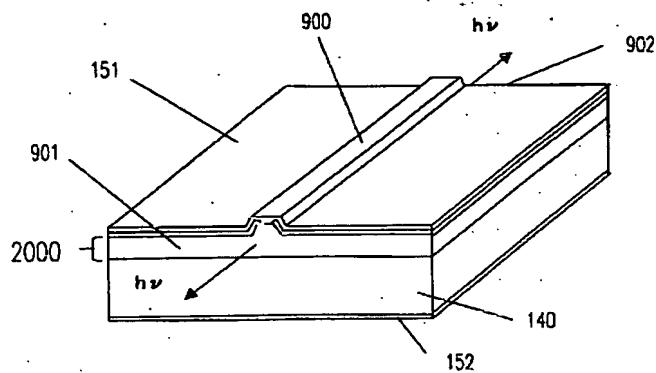
【図14】



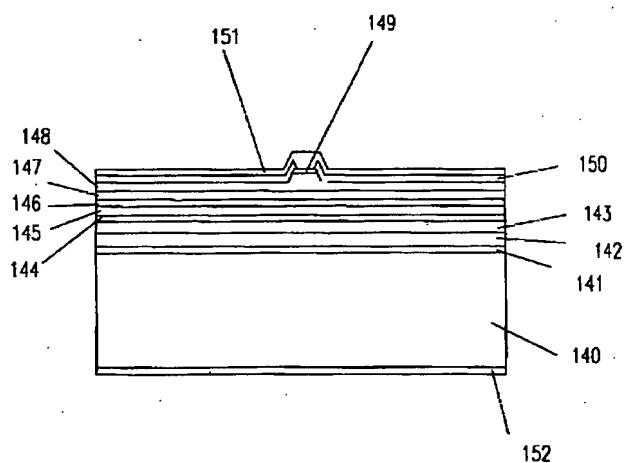
【図15】



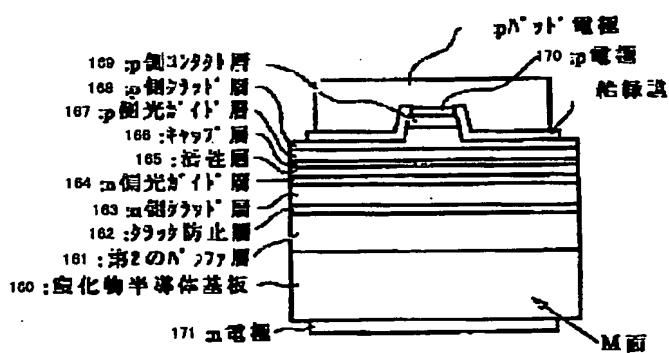
【図16】



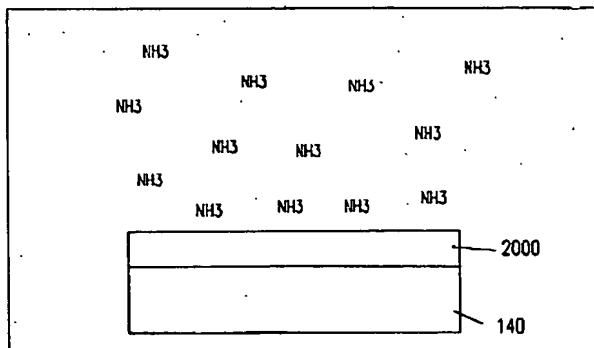
【図17】



【図19】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 三樹 剛
東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
会社リコー内

Fターム(参考) 5F041 AA03 AA21 AA43 CA40 CA57
CA65 FF13 FF14
5F045 AA04 AB14 AB17 AC08 AC12
AD12 AD14 AF04 BB16 CA12
DA53 DA55
5F073 AA13 AA45 AA74 BA01 BA05
CA07 CB05 DA05 DA11 DA21
DA31 EA28